

基于 CO 数值的造前期渣控制方法研究与应用

Research and Application on Initial Slag Control Method Based on the Content of CO gas

供稿|周志勇, 彭灿锋, 赵龙, 杨林, 潘佳, 郝泽宇 / ZHOU Zhiyong, PENG Canfeng, ZHAO Long, YANG Lin, PAN Jia, HAO Zeyu

内容导读

在转炉冶炼工艺中, 双渣法是一种重要的造前期渣的控制方法, 但传统的双渣操作存在一些缺陷, 如铁元素损失过大、钢铁料消耗相对较高等。为此, 本文提出一种基于 CO 数值造前期渣的控制方法, 通过科学调控吹氧时间、枪位和加料操作, 实现对双渣造渣形成过程的精准控制, 从而最大限度去除磷元素及有害物质, 并减少铁损失和钢铁料消耗。实验结果表明, 该方法能够提高吹炼过程的稳定性和效率, 有利于提高钢铁冶炼的质量和产量。

转炉冶炼是钢铁生产中的一项关键技术, 其中双渣法在造前期渣控制中扮演着重要角色, 该方法尤其适合处理含有较高硅、磷元素的铁水, 以及生产优质钢和中高碳钢时的吹炼过程。但是传统的双渣操作存在一定的局限性, 尤其是铁元素损失过大以及钢铁料消耗较高。鉴于此, 探寻一种方法来优化双渣操作, 减少损失并提升效率, 对于提高转炉冶炼工艺的整体性能具有重要意义。

传统双渣法操作

在转炉炼钢的双渣操作中, 传统方法是在吹炼开始后先加入一半渣料, 且这部分渣料分批次加入, 随后根据炉口火焰和化渣情况判断提枪倒渣时机, 倒掉部分炉渣后再次加入渣料, 以完成造渣过

程。此方法存在的关键缺陷如下:

(1) 在造前期渣阶段, FeO 质量分数约为 20%, 且含有约 9% 的铁珠, 导致铁损较大。

(2) 有效的脱磷温度为 1400~1500 °C, 吹氧时间过短, 会因温度不足无法形成初期渣, 进而影响脱磷效率; 而吹炼时间过长、温度过高, 则易发生炉渣回磷现象, 降低脱磷率, 因此确定适宜的倒渣时间至关重要。

(3) 传统做法主要依据炉口火焰外观及喷出物判定起渣情况, 这种判断方式易因倒渣时机不当影响前期渣的效果。

原理

在转炉炼钢的双渣操作中, 张芳^[1]研究表明,

前期渣的形成主要依赖于 C-O 反应与 FeO 含量,即碳氧反应会产生大量的热量,使熔池温度迅速升高,同时产生大量的 CO 气体。因此,CO 的产生量和速度直接反映 C-O 反应强度,也是评估炉内渣层厚度的重要依据,进而影响前期渣的形成。王新华^[2]研究得出以下几点结论:(1) CO 的产生量可作为判断倒渣时机的重要依据。当 CO 的产生量达到一定值时,说明 C-O 反应已经进行到一定程度,此时倒渣可以优化炉渣的泡沫化程度,减少铁珠生成和 FeO 含量,从而最大限度去除磷元素及其他有害物质。倒渣过早可能导致未充分反应的炉料被倒出,影响脱磷效果;倒渣过晚则可能导致炉渣过熔,增加后续处理难度。(2) CO 的产生速度可作为调整枪位和加料量的重要参考。如果 CO 的产生速度过快,说明 C-O 反应过于激烈,可能导致炉温过高、FeO 消耗过快且炉渣流动性差,影响炉渣的稳定性,此时应适当提高枪位以减缓反应速度;如果 CO 的产生速度过慢,说明 C-O 反应不足,可能导致炉温过低、FeO 聚集渣层过厚,应适当降低枪位以加快反应速度。(3) CO 的产生量和速度可作为评估炼钢效率和环保性的重要指标。若 2 个指标值适中,说明 C-O 反应充分且稳定,不仅可以提高炼钢效率,还可以减少有害气体的排放,提高环保性。

因此,通过实时监测 CO 数值的趋势变化,可以精确控制倒渣时机,优化枪位和加料量,从而显著提高炼钢的效率和环保性。

操作过程

铁耗控制在每吨钢 800 kg 的炉次,造前期渣阶段基于 CO 数值动态监控的优化操作过程如下。如图 1 所示,开吹点火后吹炼 140 s,观察到 CO 质量分数迅速上升,此时采取 2 项操作:一是将枪位提高 200 mm,二是加入 300 kg 石灰以促进炉渣发泡,通过软吹减缓 C-O 反应,从而保证炉渣达到合适的泡沫化程度。若此过程中 CO 质量分数下降或上升缓慢(维持在 30% 以下),则将供氧流量提高至 1000 m³/h 或将枪位降低 100 mm 进行硬吹,以确保 CO 质量分数平稳上升。在开吹点火后持续吹氧 4.5~5.5 min,CO 质量分数上升放缓(达到 40%~50%),表明碳氧反应即将进入激烈期,此时应采取提枪倒

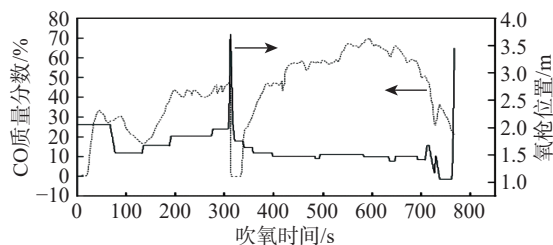


图1 吨钢铁耗 800 kg 时 CO 质量分数及氧枪位置随吹氧时间变化曲线
渣的操作,以有效控制前期渣^[2]。

铁耗控制在吨钢 880 kg 时,造前期渣阶段基于 CO 数值动态监控的优化操作过程如下。如图 2 所示,开吹点火后,通过监控 CO 质量分数的变化,动态调整枪位。吹炼 120 s 时,观察到 CO 数值持续上升,表明炉内脱碳速度加快,此时应将枪位提高 200 mm 以减缓反应速率,均衡脱碳反应,防止温度过快上升,同时确保熔池中化学反应更加均匀、平稳。吹炼至 160 s 时,观察到 CO 质量分数下降或上升缓慢,表明炉内脱碳速率不足,应降低枪位以提高反应速率,通过加剧放热反应,促进熔池温度升高,吹炼 180 s 时,CO 数值持续上升,说明炉内脱碳速度加快,故提高枪位 200 mm。通过这种调整方式,可以实现 CO 质量分数的整体平稳上升,将倒渣时间有效控制开在吹点火后 4.5~5.5 min,从而降低渣中 FeO 含量,并最大限度去除磷元素^[3]。

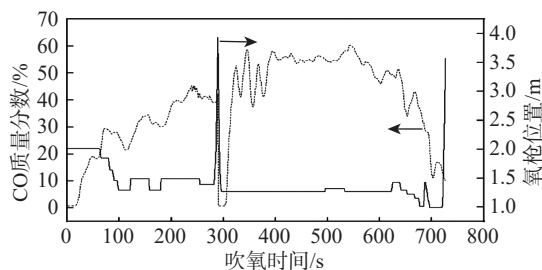


图2 吨钢铁耗 880 kg 时 CO 质量分数及氧枪位置随吹氧时间变化曲线

实施效果

脱磷效果分析

在 2[#]转炉的 21113820 炉次中,造前期渣的吹氧时间为 302 s,提枪倒渣后测温显示温度为 1395 ℃。在炼钢过程中,硅的氧化反应迅速,主要生成二氧化硅(SiO₂),尤其在吹炼初期温度约为 1300 ℃

时,由于此时石灰尚未完全熔化,初渣的氧化性较高但碱度较低,硅比碳和磷更易与氧结合并优先氧化,故脱磷能力受限。秦绪华等^[4]的研究表明,1350~1400℃时脱磷效率最佳,平均脱磷率可达63.11%,因此该温度区间被视为转炉脱磷的最佳温度。适当控制吹氧时间不仅可以提高脱磷效率,还能延长碳氧反应时间,从而还原渣中的FeO,提升铁元素的收得率。在21113820炉次的取样分析中,熔池金属的前期脱磷率达到56%,具体的金属渣样情况见表1。

表1 渣样部分化学元素质量分数 %

供氧时间/s	C	Si	Mn	P	S
0	3.950	0.580	0.250	0.150	0.020
302	2.850	0.008	0.157	0.066	0.015

在2#转炉的21113832和21113836炉次中,前期渣的吹氧时间分别为520和505s,提枪倒渣后测温显示温度分别为1480和1475℃,具体的金属渣样情况见表2。观察发现,随着吹氧时间的延长,温度上升,发生返磷现象。经取样分析,熔池金属的前期脱磷率分别为36.4%和41.7%。

表2 倒炉取样部分化学元素质量分数 %

名称	供氧时间/s	质量分数/%				
		C	Si	Mn	P	S
铁水样	0	4.080	0.620	0.280	0.151	0.021
21113832炉次	520	1.550	0.008	0.140	0.096	0.016
21113836炉次	505	1.650	0.006	0.150	0.088	0.015

杨文远等^[5]研究表明,当炉渣中FeO质量分数为13%~18%,CaO质量分数为40%~45%,且前期温度控制在1350~1400℃时,可创建最佳的脱磷热力学条件。在转炉炼钢过程中,当吹氧时间控制在4.5~5.5min时脱磷效率最高,此时炉渣中P₂O₅含量接近饱和,如图3所示。随着吹氧时间的延长,炉内温度将进一步升高,可能导致脱磷反应逆向进行,从而增加钢水中的磷含量。为了确保高效的脱磷效果,双渣冶炼模式造前期渣必须精确控制吹氧时间,避免过度升温。在炼钢过程中,脱磷反应通常是指磷从钢水中被氧化并与炉渣结合的过程,该反应的简化正向化学反应方程式可表示为

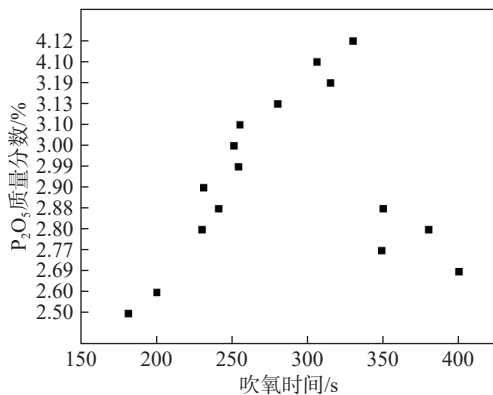
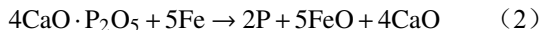


图3 吹氧时间与炉渣P₂O₅的关系

炉内温度升高,脱磷反应逆向进行^[6],即生成磷和氧化铁的反应,可表示为:



由图3可知,在转炉炼钢的吹炼前期,炉渣中P₂O₅的质量分数通常呈先升高后降低的趋势。佟帅等^[7]、董元麓等^[8]、李翔等^[9]研究表明,在吹炼前期,通过合理控制吹氧时间和调节炉渣成分,可以有效利用温度和化学反应动力学的优势实现高效脱磷。曹玲玲等^[10]的研究表明,炉渣中P₂O₅质量分数的变化反映了脱磷反应的动态平衡。实际操作中,王林珠等^[11]、蒋实^[12]研究指出,通过控制吹氧时间,调节炉渣的碱度及FeO质量分数,可以优化脱磷过程,确保炼钢效率和钢水质量。

炉渣全铁含量分析

在转炉炼钢的初始阶段,传统双渣操作常面临铁元素损失较大的问题,前期渣中TFe(全铁)质量分数高达20%,如表3所示。这种高损失不仅增加完成钢耗指标的难度,还可能因前期渣脱磷不充分,导致再次下枪操作时发生溢渣喷溅。孟华栋等^[13]研究指出,在转炉炼钢的初始阶段,精确的时间控制和温度管理是实现高效脱磷的关键;通过将吹氧时间控制在4.5~5.5min并执行倒渣操作,可以优化脱磷过程;保持倒炉在1340~1400℃测温,利用C-O反应促进熔池温度升高,有助于减少炉渣中的FeO质量分数,降低铁损失;在提枪时立即切换为氮气并持续供气20s,有助于打散炉渣中的铁珠,避免倒渣过程中铁花飞溅。实施这些措施后,倒渣取样的FeO质量分数降至13%,显著降低了前期渣的铁损和整体钢铁料的消耗如表4所示。

表 3 传统双渣操作前期渣样

炉号	试样编号	质量分数/%				碱度
		FeO	CaO	MnO	SiO ₂	
16208385	ZL2#16208385Q1	21.05	33.81	3.96	17.80	1.90
16208386	ZL2#16208386Q1	18.18	32.82	5.02	18.08	1.82
16108103	ZL1#16108103Q1	21.63	29.53	6.01	18.92	1.56
16208387	ZL2#16208387Q1	26.51	29.64	4.32	17.47	1.70
16108287	ZL1#16108287Q1	20.12	31.94	3.58	18.06	1.77
16208599	ZL2#16208599Q1	18.68	37.24	3.90	17.57	2.12

表 4 基于 CO 数值控制供氧的双渣操作前期渣样

前期渣样编号	吹氧时间/s	质量分数/%				碱度
		FeO	P ₂ O ₅	MgO	SiO ₂	
21113643	315	13.80	3.19	11.3	18.70	1.86
21113642	330	13.20	4.12	8.30	15.70	2.33
21113379	306	12.54	4.10	10.50	16.70	2.48
21113380	280	13.97	3.13	9.15	21.07	1.84

吹氧时间与炉渣 TFe 质量分数的关系如图 4 所示,可见转炉吹炼前期,炉渣中的 TFe 质量分数呈下降趋势,这不仅反映了 C-O 反应和 FeO 还原反应的有效进行,也体现了熔池温度和化学反应动力学的协同效应。理论上,吹氧过程中熔池内发生放热反应,碳与氧反应生成二氧化碳,这期间伴随温度的上升和碳含量的降低。根据脱碳反应动力学,C-O 反应速率随着温度的升高而增加,有利于促进熔池中 FeO 还原,从而减少炉渣中全铁(TFe)的质量分数^[12]。

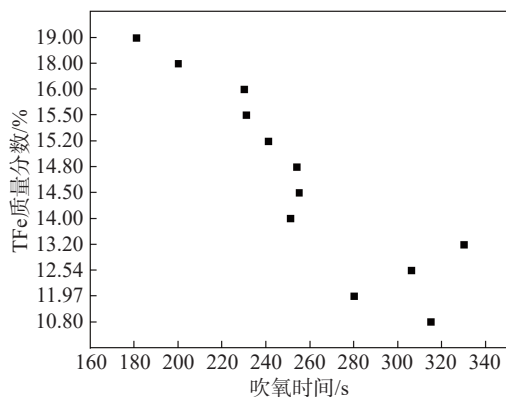


图 4 吹氧时间与炉渣 TFe 质量分数的关系

在脱磷方面,适当控制吹氧时间对提高去磷效率至关重要。叶格凡等^[14]、游香米等^[15]分析指出,过短的吹氧时间可能导致脱磷不充分,而过度吹氧

则会增加铁元素的损耗。阳春新钢铁有限责任公司^[16]研究表明,将吹氧时间控制在 4.5~5.5 min,可以有效平衡前期渣铁损失和脱磷效率,确保在最小化铁损的同时达到理想的脱磷效果。因此,通过精确控制吹氧时间,可以优化脱碳和脱磷过程,提高炼钢效率和产品质量。

综上所述,在转炉炼钢的前期阶段,通过科学控制吹氧时间可以促进 C-O 反应和 FeO 还原反应,降低炉渣中 TFe 的质量分数,减少铁损,确保高效的脱磷效果。实践证明,转炉铁耗控制 800~880 kg/t 的双渣操作中,采用基于 CO 数值动态监控造前期渣的方法,可以将吹氧时间控制在 4.5~5.5 min,是实现高效脱磷、减少铁损等目标的有效手段。

结束语

通过对 CO 生成速率的实时监测,能够客观反映炉内的化学变化,并据此针对性调整供氧枪位和加料量,确保炉内反应均衡进行,并在吹氧时长的最佳阶段执行提枪倒渣操作。经过数据分析,在铁耗为 800~880 kg 的条件下,采用双渣冶炼模式,基于 CO 数值动态监控进行前期造渣操作,可将炉渣中 Fe 的质量分数有效控制在 13% 左右,将吹氧时间控制在 4.5~5.5 min,确保炉内温度维持在 1350~1400 °C 的有效脱磷区间。该优化操作方法不仅能够

最小化铁元素损失，还能保证最高的脱磷效率，通过精细化管理实现炼钢过程的高效性和经济性，同时提高产品质量。

参考文献

- [1] 张芳. 转炉炼钢 500 问. 北京: 化学工业出版社, 2009
- [2] 王新华. 钢铁冶金—炼钢学. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [3] 苏天森. 转炉溅渣护炉技术. 北京: 冶金工业出版社, 1999
- [4] 秦绪华, 魏明贺. 转炉炼钢生产技术. 北京: 冶金工业出版社, 2017
- [5] 杨文远, 郑丛杰, 王明林, 等. 转炉高效吹炼技术的研究. 钢铁, 2001, 36(11): 13
- [6] 孙江波, 李俊国, 王彦杰, 等. 基于转炉烟气分析的熔池碳含量及温度动态预报. 炼钢, 2014, 30(4): 65
- [7] 佟帅, 李晨晓, 王书桓, 等. 温度对转炉气相脱磷渣再利用脱磷的影响. 钢铁钒钛, 2021, 42(5): 109
- [8] 董元麓, 王海川. 钢铁生产过程的脱磷. 北京: 冶金工业出版社, 2012
- [9] 李翔, 包燕平, 王敏, 等. 转炉留渣双渣工艺脱磷阶段成渣路线研究. 炼钢, 2016, 32(1): 6
- [10] 曹玲玲. 转炉熔池气-渣-金多相流行为的模拟研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2019
- [11] 王林珠, 包燕平, 李翔. 转炉留渣双渣工艺两阶段脱磷对比. 钢铁, 2019, 54(8): 37
- [12] 蒋实. 留渣+双渣转炉炼钢工艺高效脱磷技术研究. 冶金与材料, 2022, 42(6): 8
- [13] 孟华栋, 杨勇, 姚同路, 等. 复吹转炉“留渣-双渣”脱磷工艺试验. 钢铁研究学报, 2022, 34(7): 622
- [14] 叶格凡, 杨健, 鲁欣武, 等. 工艺参数对低温低碱度条件下转炉脱磷效果的影响. 炼钢, 2019, 35(6): 16
- [15] 游香米, 吴令, 杨宁川, 等. 脱磷转炉内成渣路线的理论研究. 中国冶金, 2014, 24(5): 9
- [16] 阳春新钢铁有限责任公司. 一种根据 CO 数值造前期渣的方法: 中国专利, 202211454185.4. 2023-03-07

作者简介: 周志勇 (1976—), 男, 湖南省湘潭人, 毕业于武汉科技大学冶金工程专业。主要研究方向: 转炉炼钢; 获得多项发明专利授权和省部级奖项。通信地址: 广东省阳春市潭水镇南山工业园阳春新钢铁有限公司; E-mail: zh0028o1@qq.com。